

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 23320101153151

UDC_____

厦门大学

硕 士 学 位 论 文

旋转运动模糊图像的模糊参数估计
及复原算法研究

Research on rotational motion blurred image's
parameter estimation and restoration algorithms

吴 晓 虹

指导教师: 张贻雄 副教授

专业名称: 信号与信息处理

论文提交日期: 2013 年 5 月

论文答辩日期: 2013 年 5 月

学位授予日期: 2013 年 6 月

答辩委员会主席: 

评 阅 人: _____

2013 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名): 吴瑞明

2013 年 5 月 29 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

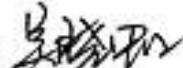
本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

() 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

☒) 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）： 

2013 年 5 月 29 日

摘 要

在曝光时间内，由于成像设备与目标景物之间存在相对旋转角度，造成的图像模糊就是旋转运动模糊。旋转运动模糊是一种空间可变模糊，即离旋转中心越远，模糊越严重。本文的研究目标就是对旋转运动模糊图像进行盲复原，主要工作如下：

1、用数学描述旋转运动模糊图像的退化模型，利用计算机仿真旋转运动模糊图像。

2、介绍常用的匀速运动模糊图像的退化参数——模糊方向和模糊尺度的检测算法，并利用计算机仿真，进行多种算法效果的对比。

3、根据运动模糊只是降低了运动方向上图像的高频分量的原理，本文提出了基于微分法的旋转中心检测算法，实验证明利用该算法能够准确有效检测旋转中心。

4、在旋转中心已知的前提下，通过极坐标变换法，采用自相关法和误差-参数分析法对旋转角度进行估计。其中，误差-参数分析法抗噪性较好，检测结果较为有效、稳定。

5、将图像的稀疏表示运用于图像的退化模型中，构建基于稀疏理论的旋转运动复原模型，通过与经典复原算法的仿真对比，实验证明基于稀疏理论的去运动模糊算法能有效复原旋转运动模糊图像，并对高频部分（即纹理细节）信息复原效果较好。

关键词：旋转运动；中心检测；图像复原

Abstract

Rotational motion-blurring is caused by the relative rotational angle between camera and objects within exposure. Rotational motion blur is space-variable, which means that the farther away the image is from the center of rotation, the more it blurs. The goal of this paper is to do the blind restoration of rotational motion blurred images, and the main work is as follows:

1. It describes the degradation model of the rotational motion blurred image by mathematical description, and then computer simulation is used to imitate the image.
2. It reviews commonly used algorithms for parameter estimating of the uniform linear motion blurred images, then it tries through computer simulation a contrast between the experiment results of different algorithms.
3. According to the observation that motion blur just reduces the high frequency components of the image in the direction of movement, we propose a new algorithm to detect the rotational center based on differentiation. The experimental results show that the new method can detect the rotating center effectively and accurately.
4. If the center of rotation is known, we take auto-correlation and error-parameter analyses after polar transformation. Experiments prove that error-parameter analysis is more noise-resistant and produces more stable results.
5. We apply sparse representation to image degradation model, and build a rotational motion restored model. Through the comparison with classic restoration algorithms through computer simulation, experiments show that the deblurring algorithm based on the sparse theory can effectively restore the rotational motion blurred image, especially the high-frequency portion.

Key words: rotational motion; center detection; image restoration

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题研究的目的和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 运动模糊参数的估计	2
1.2.2 图像复原算法	4
1.3 课题研究内容及论文组织结构	5
第二章 运动模糊图像复原基础理论	7
2.1 图像数学基础	7
2.1.1 卷积	7
2.1.2 傅里叶变换	9
2.2 成像系统的数学描述	10
2.3 运动模糊图像退化模型	11
2.3.1 一般退化模型	11
2.3.2 运动模糊图像退化模型	12
2.3.3 旋转运动退化模型	14
2.3.4 旋转运动模糊图像的计算机仿真	16
2.4 经典复原算法	18
2.4.1 维纳滤波	19
2.4.2 有约束最小二乘法	20
2.4.3 Lucy-Richardson 迭代	23
2.5 图像评价方法	24
2.5.1 主观评价方法	24
2.5.2 客观评价方法	26
2.6 本章小结	29
第三章 旋转运动模糊图像退化参数估计	30
3.1 匀速直线运动模糊参数检测	30
3.1.1 运动方向检测	30
3.1.2 模糊尺度检测	34
3.2 旋转运动模糊参数检测	38
3.2.1 旋转中心检测	38
3.2.2 旋转角度检测	45
3.3 本章小结	50

第四章 旋转运动模糊图像的复原	51
4.1 基于稀疏理论的运动模糊图像复原	51
4.1.1 图像稀疏理论.....	51
4.1.2 基于稀疏理论的运动模糊图像复原模型.....	52
4.1.3 稀疏变换矩阵.....	53
4.1.4 基于基追踪算法的一范数正则化形式求解.....	53
4.1.5 仿真实验.....	55
4.2 旋转运动模糊图像的复原	56
4.2.1 常用的旋转运动模糊图像复原步骤.....	56
4.2.2 基于稀疏理论的旋转运动模糊图像复原.....	57
4.2.3 仿真实验.....	58
4.3 本章小结	64
第五章 总结和展望	65
5.1 本文工作总结	65
5.2 未来工作展望	66
参考文献.....	67
攻读学位期间科研成果	70
致谢.....	71

Contents

Chapter1 Introduction	1
1.1 The objects and significanies of the study.....	1
1.2 The actuality and achievement at home and abroad	2
1.2.1 The estimate of motion-blurring parameter	2
1.2.2 Image restoration algorithms	4
1.3 The main work and content arrangements of this paper	5
Chapter2 Theoretical Basis of Motion Blurred Image Restoration ..	7
2.1 Image mathematical foundations	7
2.1.1 Convolution.....	7
2.1.2 FFT	9
2.2 The mathematical description of the imaging system.....	10
2.3 Motion blurred degradation model.....	11
2.3.1 General degradation model	11
2.3.2 Motion Blurred Degradation Model	12
2.3.3 Rotational motion Blurred Degradation Model	14
2.3.4 Computer Simulation for Rotation Motion Blurred Image.....	16
2.4 Classical restoration algorithm.....	18
2.4.1 Wiener filter	19
2.4.2 Constrained least-squares filter	20
2.4.3 Lucy-Richardson filter	23
2.5 Evaluation algorithm of image restoration.....	24
2.5.1 Objective evaluation	24
2.5.2 Subjective evaluation	26
2.6 Brief summary	29
Chapter3 Parameter Identification of raotaional motion blurred	
Image	30
3.1 Parameter Identification of linear motion blurred Image	30
3.1.1 The detection of motion direction	30
3.1.2 Identification of blur extent	34
3.2 Parameter Identification of raotaional motion blurred Image.....	38
3.2.1 Identification of rotational center.....	38
3.2.2 Identification of rotational angle.....	45

3.3 Brief summary	50
Chapter4 Restoration of Rotational motion blurred image	51
4.1 Motion blurred image restoration based on the theory of the sparse	51
4.1.1 Theory of the sparse of image	51
4.1.2 The restoration of motion blurred image based on the theory of the sparse	52
4.1.3 Sparse transformation matrix	53
4.1.4 The solution for ℓ_1 -based restoration by BP	53
4.1.5 Simulation	55
4.2 Restoration of Rotational motion blurred image	56
4.2.1 General recovery steps of rotational motion blurred image	56
4.2.2 The restoration of rotational motion blurred image based on the theory of the sparse	57
4.2.3 Simulation	58
4.3 Brief summary	64
Chapter5 Conclusion and expectations	65
5.1 Conclusions	65
5.2 Future work	66
References	67
Achievements during master study.	70
Acknowledgements	71

第一章 绪论

1.1 课题研究的目的是意义

图像复原是图像处理技术的一个重要分支,利用退化现象的某种先验知识,来重建或复原被退化的图像。其复原技术就是把退化过程模型化,并且采用相反的过程进行处理,以达到改善图像质量,最大程度恢复退化图像的目的^[1]。造成图像退化的原因有很多种,运动模糊是最为常见的一种。在成像过程中,由于拍摄装置与被摄景物之间存在快速的相对运动,造成在一次曝光的过程中能量在成像平面上的非正常累积,使得所获得的图像产生模糊,即运动模糊。在实际拍摄图像过程中,运动模糊是很常见的,如路上的电子摄像头拍摄奔驰而过的汽车车牌,日常照相在拍摄瞬间相机抖动,从行驶的火车上拍摄窗外景物等等都可能造成所拍摄的图像模糊。图像模糊是图像退化的一种,掩盖了许多有用信息,给人们生活和图像研究带来了诸多不便。随着科技的不断进步和人民生活水平的不断提高,高质量的图像越来越受人们需求,运动模糊的复原在光学防抖、机器视觉、视频监控等等很多领域都有着十分广泛的应用。

运动导致的图像退化可以分为多种类型,如直线运动模糊,旋转运动模糊,不规则运动模糊等等。早在上世纪 60 年代 Lohmann 和 Paris 就曾对图像各视场退化不同这一现象进行了讨论^[2],根据退化函数同空间位置的关系,运动模糊分为空间可变模糊和空间不可变模糊。像直线匀速运动模糊就属于空间不可变模糊,如前面所提到的在行驶的火车上拍摄窗外的景物等,而本文所研究的旋转运动模糊是空间可变运动模糊的一种,即图像的退化函数随成像物体位置的变化而变化。当成像物体同成像设备作旋转运动时,所拍摄照片就会出现旋转模糊现象,且离旋转中心越远,旋转模糊越严重。旋转模糊在航空成像中较为常见,如弹体的飞行过程中会发生旋转,飞机做盘旋、偏航运动时,弹载或机载的成像系统就会出现旋转运动模糊。这样的模糊图像会给后期的工作造成困难,因此运动模糊的复原也是模式识别、图像匹配、电子稳像等等后继工作的基础,有着十分重要的研究价值。如何找到一种恢复效果理想且实时性好的恢复算法是整个处理过程的基础,也是十分有现实意义的课题。

1.2 国内外研究现状

前面提到,运动模糊是由于成像过程中相机与物体之间存在着相对运动,则运动模糊图像可以理解为原始景物在不同时刻的无限多个影像叠加而成的。它等效于对原始图像在邻域上作了一次平均再乘上曝光时间,邻域的范围与运动方向和运动尺度有关。也就是说,运动模糊对原始图像起到了平滑的效果。如果邻域范围越大,则图像越模糊。要复原运动模糊图像,需要先估计图像退化过程,建立相应的数学模型,再对由于退化造成的失真加以补偿,以获得原图像最优估计值。因此,运动模糊图像的复原研究现在主要分为两个方面:一是对图像运动模糊参数的估计,另一个就是图像复原算法。

1.2.1 运动模糊参数的估计

在直线运动模糊中,运动模糊参数主要有两个:模糊方向和模糊尺度。

无论是模糊方向还是模糊尺度的检测方法都可以根据是在频域上和空间域上处理而分成两大类。频域上,根据匀速直线运动点扩散函数的时频特性可知,匀速直线运动模糊图像对应的频谱图上有周期性分布的暗条纹,并且暗条纹的方向与相对运动的方向相垂。^[3]Cannon等利用这一特征在理论上证明从匀速直线运动模糊图像中估计运动方向和相对运动尺度的可行性。王晓红等人^[4]也从现象上论证了模糊距离和频谱图像中心与相邻暗条纹间的距离成反比,模糊方向与频谱中的平行暗条纹垂直,但均未给出自动鉴别模糊方向的具体算法。R. Lokhande等人^[5]利用霍夫变换对暗条纹的方向和暗条纹间的距离进行鉴别并进而检测出运动方向和模糊尺度,但在暗条纹不明显时这种方法的检测将会非常困难。Moghaddam^[6]则是采用 radon 变换代替 Hough 来检测暗条纹,但对噪声非常敏感。郭红伟^[7]鉴于前面方法的缺点,利用高斯-拉普拉斯边缘检测算子突出频谱中暗条纹轮廓,以提高方向的估算精度。还有一种倒谱法^[8],利用运动模糊图像的倒谱在模糊方向上存在反映原始图像特性的高幅值成分和反映模糊系统特性的低幅值成分来鉴别 PSF 参数,但鉴别范围小。空域上,由于运动模糊图像的空间域特性,使得图像在运动模糊方向上,低频成分的强度增强,高频成分的强度降低,也可以理解为运动模糊退化在运动模糊方向上对原始图像进行了一次低通滤波。基于此原理,Y.Yitzhaky 等^[9]采用一个 2×2 的一阶微分算子对图像各个方向

进行处理,获得微分绝对值之和最小的方向即为运动模糊方向,完成运动模糊方向鉴别。然而,该方法存在一定问题,其鉴别误差比较大,鉴别误差总是倾向于负值(鉴别结果总是偏向 0° ,而且只能鉴别 $0\sim 45^\circ$ 范围内的运动模糊方向)。陈前荣等^[10,11]提出了一种比较有效的运动模糊角度鉴别方法,构造出 3×3 方向微分算子,利用该算子对运动模糊图像进行卷积操作,利用方向微分的特点和双线性插值方法,可自动鉴别出运动模糊方向。在模糊尺度的空域检测方法上,邹谋炎^[12]提出从小到大改变退化PSF参数值的误差-参数曲线法,但计算量大且精度不高。张采芳等人^[13]通过引入奇异性、光滑性和平坦度因子对误差-参数曲线进行分析,给出新的点扩展函数的估计算法,精度较高。Y.Yitzhaky等人^[9]利用由水平方向上求一阶微分图像的自相关并将各列相加得到鉴别曲线的方法检测模糊尺度,该曲线的对称的两个极小点即为运动模糊尺度的一半。由于该方法是基于图像一阶微分,其对噪声较为敏感,尤其是椒盐噪声,而且在图像特征较少时识别精度不高。

在旋转运动模糊中,由于其运动特殊性,其参数可以定义为旋转中心和旋转角度。

旋转中心的检测方面的文献较少,现在主要有两种方法,一种是分块法,将图像分成等大小的块,先测试每一分块的模糊角度,再采用最小二乘法拟合检测圆心方程,求出旋转中心^[14]。还有一种方法是在模糊图像的边缘图中提取有效圆弧,再利用最小二乘拟合算法求得旋转中心^[15]。这两种方法要得到准确结果都需要有效的最小二乘拟合方程输入值,因此难以进行准确判别。

在旋转角度的检测上,由于旋转运动模糊图像属于空间可变模糊,主流方法是经过极坐标变换为空间不可变模糊,再将直线运动模糊的检测方法运用到旋转运动模糊。邸慧^[16]提出了将自相关法运用到旋转运动模糊图像上;王文颖^[17]结合Bresenham画圆算法的思想,提取圆弧像素,将自相关法和误差-曲线法应用到提取的圆弧上,均能较为有效地检测到 35° 以内的旋转角度。而文献[15]中的基于峰度最小化和误差约束的旋转角度辨识方法,是根据运动模糊只降低了图像沿模糊方向的高频成分,压缩了图像的灰度变化范围,使模糊图像的灰度分布趋于集中而令峰度值变大的原理,以峰度值为基准,在一个合理的范围内选择不同的旋转角度来进行恢复,取最小峰度值所对应的参数作为旋转角度的估计。

1.2.2 图像复原算法

图像复原是利用对于退化的先验知识恢复图像的原貌,即对估计图像退化过程建立相应的数学模型,对由于退化造成的失真加以补偿,获得原图像最优估计值。

最早使用在运动模糊图像上的是逆滤波技术,在上世纪六十年代,逆滤波算法是图像恢复的一种标准技术。但是这种方法对于噪声很敏感,在噪声较大的情况下,图像恢复的效果不明显。考虑大部分图像中,邻近的像素是高度相关的,同时为了减少噪声的干扰,Helstrom^[18]采用最小均方误差估计方法,提出了维纳滤波器。但是维纳滤波只是在最小均方意义下的最优方法,针对某个具体图像,它不一定是恢复图像的最好方法。Canon 提出了功率谱均衡滤波器^[19],它和维纳滤波器类似,但是在某些情况下,它的恢复性能优于维纳滤波器。后来提出了许多基于非线性模型的复原方法,借助 EM(Expectation Maximization)实现了许多基于贝叶斯模型复原方法的求解,如最大熵法^[20]、最大后验概率法^[21]等。还有 Lucy-Richardson 复原算法^[22],也是经典算法,属于迭代非线性复原算法,它设定待处理图像符合泊松分布,以最大似然准则作为其最优估计,通过多次迭代使解收敛于最大似然解,其缺陷在于迭代次数未知,且在迭代过程中存在噪声放大问题。这些图像复原技术都是假设退化函数已知,基于反卷积和规整化在信号复原和噪声抑制之间取得平衡。还有些学者将正则化方法^[23]、小波变换^[24]等技术也运用到运动模糊恢复中,使模糊图像的恢复效果不断得到改善。近年来,作为研究热门的稀疏表示模型被广泛地应用于信号和图像处理等领域,它是 Olshausen 和 Field 等人在研究人类视觉皮层神经元响应的稀疏性时提出的对自然图像更有效的表示方法^[25, 26]。有学者尝试用稀疏表示来解决图像复原问题,如文献[27-29],也取得了不错的进展。

基于前面所述的几种经典复原算法,针对旋转运动这一空间可变的特殊性,现在的旋转运动模糊复原方法主要分为三类:极坐标转换法、沿模糊路径去卷积法和分块法。早在上世纪七十年代,Sawchuk 对非线性运动造成的退化图像恢复问题进行了研究^[30]。对于这些随空间变化的退化图像,当所需的几何变换已知时,利用坐标变换到空间不变图像,运用经典算法复原图像,再进行空间逆变换,能够取得较好的恢复效果。基于每次变换都要进行采样和插值,导致丢失和附加

模糊和噪声。近几年的研究学者在进行旋转运动模糊复原时,通过画圆算法提取模糊路径上的像素,即将二维的去卷积转换为多次的一维去卷积,如邸慧^[31]提出一种基于 Z 变换的匀速圆周旋转运动模糊复原算法。洪汉玉提出一种图像复原的代数方法^[32],该方法基于空间相关约束和最小二乘原理,能够沿模糊路径对退化图像进行复原。分块法是指将图像划分为块,每一块图像的 PSF 近似认为不变,在该图像块中完成图像复原,然后把复原后的图像块拼接起来得到最终图像。1978 年 Trussell 和 Hunt 提出了基于图像分块的复原算法^[33],之后 Costello^[34]详细讨论了图像分块的方式,图像块以及重叠区域的大小对图像复原质量的影响(仅考虑光学系统造成的退化)。L. Bar^[35]对算法进行了改进,针对局部模糊图像先使用交替最小化方法寻找模糊图像边界,然后利用抑制边缘振铃波纹的 Mumford-Shah 规整化方法复原图像,也取得了很好的实验效果。分块复原法的优点是明显的,它可用于处理任何空间可变模糊图像,且能与现有的任何空间不可变模糊图像复原算法结合使用。然而区块的有效划分,各区块内 PSF 的提取,复原后图像块的无缝拼接等问题仍是今后需要为之努力的方向。

1.3 课题研究内容及论文组织结构

图像复原的难易程度主要取决于对退化过程先验知识掌握的精确程度。如果对退化的过程和退化参数掌握比较清楚,那么就可以根据图像退化的先验知识较为精确地估算出系统退化的点扩展函数,并以此为基础,采用各种复原算法对图像进行复原。本课题致力于旋转运动模糊图像的盲复原,研究的主要内容可以分为三部分:

- 1) 分析旋转运动模糊退化模型,用计算机仿真旋转运动模糊图像。
- 2) 提出能准确有效检测旋转运动模糊退化参数——旋转中心和模糊角度的检测算法,准确估计退化函数。

- 3) 改进复原算法实现模糊图像的校正。

整篇论文的组织结构如下:

第一章:简要介绍课题研究的目的是和意义,分析该课题在国内外的研究现状。阐述课题的研究方向及主要内容,最后对论文的组织结构进行说明。

第二章:简要介绍运动模糊图像的一些基本理论,介绍了卷积反卷积的基础

理论、运动模糊图像的一般退化模型、经典的复原算法以及图像评价的基本理论。

第三章：详细介绍运动模糊图像参数的检测算法，并提出了基于微分法的旋转中心检测算法，实验证明此算法能够准确检测选择中心。

第四章：将基于稀疏理论的图像复原算法应用于旋转运动模糊图像的校正中，并用 GMG、PSNR、SSIM 等图像客观评价参数对复原图像进行评价。

第五章：对本文的工作进行总结，并对今后的工作进行展望。

第二章 运动模糊图像复原基础理论

一般来说,图像复原需要根据相应的退化模型和知识重建或者恢复原始图像。换句话说,图像复原的最终目的是改善图像,复原技术就是把退化模型化,并采用相反的过程进行处理。

对于退化图像的复原,一般可以采用两种方法。一种方法适用于对图像缺乏先验知识的情况,此时可以对退化过程(模糊和噪声)建立模型,进行描述,进而寻找一种去除或者削弱其影响的过程。由于这种方法试图估计图像退化过程影响以前的情况,所以是一种估计方法。另外一种方法适用于对原始图像有足够的先验知识,可以对原始图像建立一个数学模型并且对退化图像进行恢复。例如,假设已知图像中仅仅含有确定大小的圆形物体(例如星星、颗粒、细胞等等),这样,由于仅仅是原始图像很少几个参数(数目、位置、幅度等等)未知,因此这是一个检测问题。

图像复原方法选择很多,首先问题既可以用连续数学,也可以用离散数学进行处理;其次,处理既可以在空间域中进行,也可以在频域中进行;另外,在给定模型的条件下,图像复原技术还可分为无约束和有约束的两大类。

本章将从图像的一些数学基础入手,介绍图像成像原理、图像退化模型、经典复原算法以及一些图像评价方法。

2.1 图像数学基础

2.1.1 卷积

图像复原问题一般都要涉及卷积的概念。假设 $h(t)$ 是一个线性时不变系统的脉冲响应,它的输出信号 $y(t)$ 可以表示成输入信号 $x(t)$ 和 $h(t)$ 的卷积

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau)x(\tau)d\tau \quad (2-1)$$

对于因果系统,在输入激励脉冲出现时刻 $t_0 = 0$ 以前, $h(t) = 0$ 。作为一个有意义

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库